

LQG 설계에 의한 RTP 온도제어 시스템

An RTP Temperature Control System Based on LQG Design

송 태 승, 유 준

(Tae-Seung Song and Joon Lyou)

Abstract : This paper deals with wafer temperature uniformity control essential in rapid thermal processing (RTP). One of the important control objectives of RTP is to keep the temperature over the wafer surface as uniformly as possible. For this, a discrete time state equation around the operating point is first identified by using the subspace fitting method, and a multivariable LQG(Linear Quadratic Gaussian) controller is designed based on the identified model. Simulation and experimental results show improvement in temperature uniformity over the conventional PID method.

Keywords : RTP, temperature control, multivariable LQG design, system identification

I. 서론

현재 우리나라의 반도체 산업은 지나치게 메모리 분야에 편중되어 있으며, 그에 소요되는 장비와 시설은 대부분 외국기술에 의존하고 있다. 급속한 반도체 산업의 발전은 지속적인 초고집적화·고속화를 요구하고 있는 바, 이의 실현을 위해서는 새로운 공정의 개발과 새로운 개념이 도입된 공정장비의 개발이 우선되어야 한다. 근래에 이르기까지 반도체 생산에서 열처리 공정은 주로 대용량의 가열로(furnace)에서 이루어져 왔다. 그러나 최근 소자의 고집적화와 웨이퍼(wafer) 크기의 증가로 단일 웨이퍼 열처리를 할 수 있는 고속 열처리 공정(Rapid Thermal Processing; RTP)이 검토되고 있다. 이는 필수적으로 요구되는 공정기술 및 환경의 변화에 대처할 수 있는 유연성을 지닌 공정기법으로, 많은 웨이퍼를 동시에 큰 가열로에 넣어 오랜시간 가열하는 기존의 방식과 달리 여러 단위공정들을 웨이퍼의 이동 없이 하나의 장비에서 처리하므로 잦은 이동으로 인한 웨이퍼의 오염을 줄이고, 실시간 제어를 통한 작업시간의 단축과, 고온의 장시간 공정에서 발생하는 바람직하지 않는 열적 효과(thermal effect)를 최소화할 수 있다[1].

RTP 시스템에서 가장 중요한 문제는 웨이퍼상의 온도가 기준 온도제어를 정확히 따르도록 하는 것과, 미세한 박막의 형성을 위해 웨이퍼 전 영역에 균일한 온도를 유지하도록 온도제어를 수행하는 것이다. 그동안 까다로운 온도제어 성능을 맞추기 위하여 국내외적으로 여러가지 고급제어기법들이 제시되어 왔다. 우선, 처음으로 시험용 RTP 장비를 설계·제작하여 많은 연구결과를 내오고 있는 미국 Stanford 대학의 경우 온도제어에 좋은 결과를 보인 바 있다[2][6]. 그러나 국내의 몇몇 기관에서 비슷한 연구를 수행한 실적이 있는 것으로 조사되었지만 온도제어 기법을 실험적으로 다루는 시도는 없었던 것으로 알고 있다[3][4][5]. 본 연구에서는 대상공정의 특성에 맞고, 실제 적용이 유리한 다변수 공정제어기를 설계하고 실험적 검증에 치중하였다. 좀더 구체적으로 실제 장비로부터의 실

험데이터에 식별기법을 적용하여 다변수 열전달 모델을 추정하고, 온도 균일도 향상을 위해 LQG 제어기법을 이용한 온도제어기를 설계하였다. 시뮬레이션을 통하여 설계된 제어기의 주파수 응답특성을 보이고, 실제 장비에 적용실험을 통해 기존의 PID 제어 결과[11]와 성능을 비교하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 고속 열처리 공정기의 개요 및 구성을 간단히 설명하고, III장에서는 부분공간 적합화법(subspace fitting method)을 이용한 시스템 모델의 식별절차를 기술한다. IV장에서는 다변수 LQG 제어기를 설계하고, V장에서 실험결과를 보이며 마지막 VI장에서는 결과를 요약하고 추후과제에 대해 언급한다.

II. 고속 열처리 공정기

RTP는 반도체 제조공정에서 웨이퍼를 열처리하는 공정으로 담금질(annealing), 산화(oxidation), 화학적 증기 증착(chemical vapor deposition) 등을 할 수 있다. 대부분의 RTP 시스템은 공정실(chamber) 윗면에 설치된 여러 형태의 램프로부터 복사열을 이용하여 웨이퍼를 가열하게 된다. 이때 절대온도 T 로 인한 복사에너지 W 는 Stefan-Boltzmann의 복사법칙에 의해 다음과 같이 기술된다[2].

$$W(T) = \epsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

ϵ : emissivity

σ : Stefan-Boltzmann constant

$$(5.6697 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4)$$

RTP에서는 복사의 원리를 이용해서 램프나 반사판(reflector)이 석영판 아래의 웨이퍼를 가열하게 된다. 가열된 웨이퍼의 온도측정은 웨이퍼에 부착된 열전대(thermocouple)센서를 이용해 측정하고, 결과는 제어기로 출력된다. 웨이퍼 가열을 위한 열원은 고속가열이 가능하며, 열원에 의한 웨이퍼의 오염이 없는 직선형태의 텅스텐-할로젠 램프를 사용한다. 본 연구의 대상으로한 장비는 14개의 직선형태로 된 램프가 설치되어 있으며, 이들은 중앙으로부터 6개, 4개, 4개씩 세 구역으로 나뉘어 제어된다.

공정실의 재질은 스테인레스 스틸(stainless steel) 또는 알루미늄(aluminum)등으로 되어 있다. 지지대위의 웨이퍼는 열원의 순간적인 발광에 의해 열을 흡수하여 가열되고, 전력차단에 의해 냉각된다. 램프와 웨이퍼사이에는 투명한 석영판(quartz window)으로 분리되어 있다. 챔버 외벽은 대부분이 냉각수를 이용하여 낮은 온도를 유지하도록 하고 있으며, 이는 챔버 벽면에 먼지입자 형성을 막고 챔버 구성요소를 보호하기 위해서이다. 그림 1은 열전대 센서로 온도를 측정하고, 제어가 포함된 RTP 시스템의 전체구조이다.

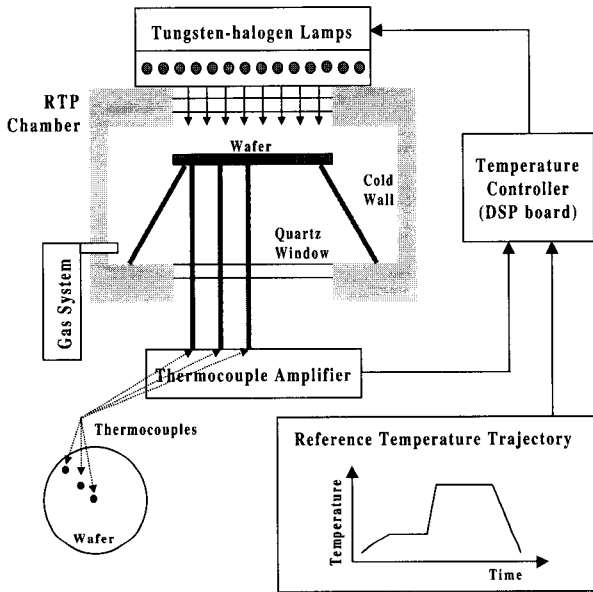


그림 1. RTP 시스템의 전체구조.
Fig. 1. Overall structure of RTP system.

III. 다변수 시스템 모델의 식별

1. 부분공간 적합화법

정밀한 온도제어를 위해서는 RTP 반응 챔버내의 열전달 모델을 정확하게 알아야 한다. 그런데 RTP 시스템의 열전달 모델은 비선형적이고, 주변의 영향을 많이 받아 정확한 모델을 예측하기 어렵다. 본 연구에서는 실제 장비로부터 식별기법을 적용하여 다변수 열전달 모델을 추정한다. 사용된 식별기법은 다변수 시스템을 다루기 쉽고, 이산시간 상태방정식을 직접 얻을 수 있는 부분공간 적합화법을 이용한다. 이때 입력은 램프 구동기에 인가되는 3개의 전압이며, 출력은 웨이퍼상의 세곳에서 측정되는 온도값이다. 우선 n 차의 다변수 이산시간 상태공간 모델을 나타내면 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A x_k + B u_k + w_k \\ y_k &= C x_k + D u_k + v_k \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $x_k (\in \mathbb{R}^{n \times 1})$ 는 상태벡터이고, $u_k (\in \mathbb{R}^{n_i \times 1})$ 와 $y_k (\in \mathbb{R}^{n_o \times 1})$ 는 다변수 입·출력 벡터이다. 또한 플랜트에는 불규칙 공정잡음 w_k 와 측정잡음 v_k 가 존재한다. 식별의

목적은 입·출력 벡터로부터 시스템 행렬 A, B, C 와 D 를 결정하는데 있다. De Moor가 제안한 부분공간 적합화법은 다음의 출력방정식으로부터 유도된다[6-8].

$$Y = \Gamma_M X + H U \quad (3)$$

여기서 $Y (\in \mathbb{R}^{M_o \times N})$, $\Gamma_M (\in \mathbb{R}^{M_o \times n})$, $X (\in \mathbb{R}^{n \times N})$, $H (\in \mathbb{R}^{M_o \times M_i})$, $U (\in \mathbb{R}^{M_i \times N})$, 그리고 $M_o = n_o M$, $M_i = n_i M$ 이고 이때 M 은 슬라이딩 윈도우 크기이다. 출력방정식에서 블록한켈행렬(block Hankel matrix)로 구성된 Y, U 행렬과 나머지 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y &= \begin{bmatrix} y_k & y_{k+1} & \dots & y_{k+N-1} \\ y_{k+1} & y_{k+2} & \dots & y_{k+N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{k+M-1} & y_{k+M} & \dots & y_{k+M+N-2} \end{bmatrix} \\ \Gamma_M &= \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{M-1} \end{bmatrix} \\ X &= [x_k \ x_{k+1} \ \dots \ x_{k+N-1}] \\ H &= \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CB & D & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & D & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{M-2}B & CA^{M-3}B & CA^{M-4}B & \dots & D \end{bmatrix} \\ U &= \begin{bmatrix} u_k & u_{k+1} & \dots & u_{k+N-1} \\ u_{k+1} & u_{k+2} & \dots & u_{k+N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{k+M-1} & u_{k+M} & \dots & u_{k+M+N-2} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Γ_M 의 구조에 의해 $\Gamma_M T$ 로 부터 A 와 C 행렬을 식별한다. 이때 T 는 비특이(nonsingular)행렬이고, $\Gamma_M T$ 는 U 의 Right Annihilator U^1 를 이용하여 추정한다. 유사하게 HU 는 Γ_M 의 Left Annihilator Γ_M^1 에 의해 분리된다. $\Gamma_M^1 H U$ 에서 식별된 A 와 C 가 주어지면 B 와 D 는 쉽게 결정된다.

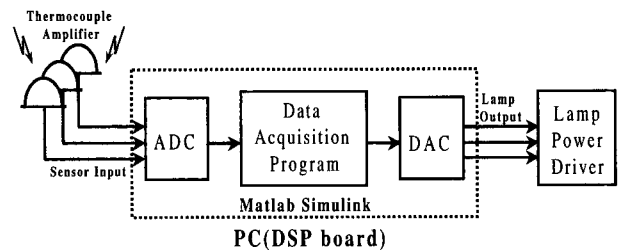


그림 2. 데이터 취득 시스템의 구성.
Fig. 2. Configuration of data acquisition system.

2. RTP 모델의 식별

RTP 시스템의 모델은 온도대별로 많은 차이가 있으므로 이번 연구에서는 관심있는 800°C 부근에서 정상 제어 입력에 $\pm 0.5V$ 로 변하는 독립적인 PRBS(Pseudo Random Binary Sequence)신호를 더하여 온도출력이 변화되도록

하였다. 데이터 취득은 DSP(TI320C32) 보드내의 12bit ADC 보드를 사용하고 샘플링 주기는 100Hz로 하였으며, 0°C~1300°C 범위에서 A/D 변환기는 0.3°C의 분해능을 갖는다. 그림 2는 데이터 취득 시스템의 구성을 나타낸다.

데이터 취득 동안 챔버내 환경은 일반적으로 실리콘 웨이퍼를 처리할 때 사용되는 1 torr의 압력과 100 SCCM의 질소가 흐르도록 하였다. 또한 RTP 시스템이 충분히 반응할 수 있도록 PRBS 최소 변화시간은 2초로 하였다. 그림 3은 취득된 출력온도와 입력전압 궤적을 나타낸다. 그림은 150초 동안 얻은 데이터중 식별에 사용된 50초에서 75초 사이의 2,500개의 데이터를 나타낸다.

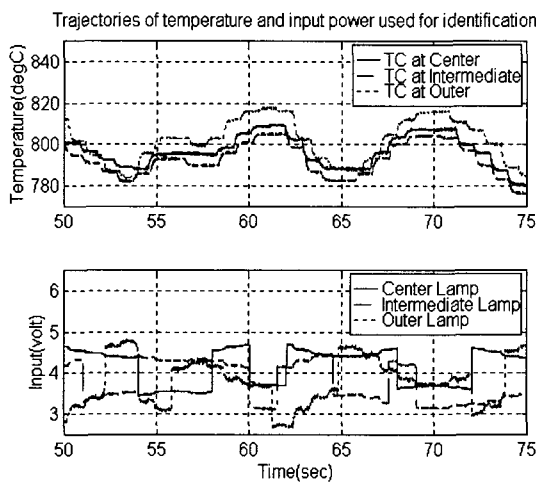


그림 3. 식별을 위한 온도·전압 궤적.

Fig. 3. Trajectories of temperature and power for identification.

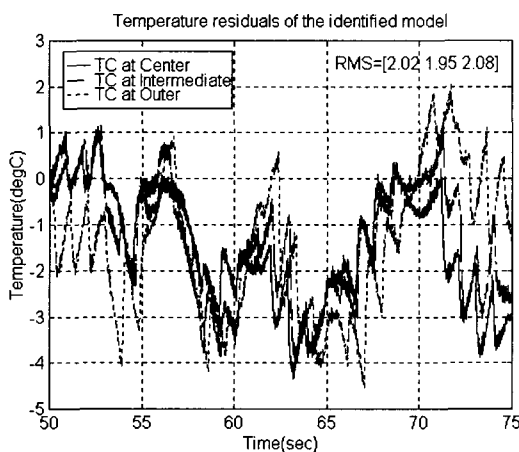


그림 4. 식별된 모델의 온도 잔여치.

Fig. 4. Temperature residual of the identified model.

식별은 Matlab 함수를 이용하여 수행하였으며 결과로 5차의 다변수 이산시간 상태공간 모델을 얻을 수 있었다. 이번 식별에서는 150초동안 총 15,000개의 데이터를 수집

하였고, 그중 50~75초구간의 데이터를 이용하여 식별을 수행하고 결과의 타당성을 검증하기 위하여 식별실험에서와 똑같은 제어입력을 식별된 다변수 모델에 가하여 응답을 구하고, 실제 측정된 출력과 추정된 응답과의 차인 잔여치를 구해 보았는데 그 결과는 그림 4와 같다.

그림 4를 보면 3곳에서 추정된 응답 모두 실제값으로부터 최대 5°C 이내의 오차를 보이고 있으며, 계산된 이들의 RMS(Root Mean Square)값은 2.02°C, 1.95°C, 2.08°C로 구해진 모델이 실제 열전달 모델을 잘 묘사하고 있다고 판단된다.

IV. LQG 제어기 설계

RTP 시스템에서 웨이퍼 온도제어에 관한 일반적인 제어규격은 산화막 형성에 대해서는 ±3°C 범위, 그 외 다른 공정에 대해서는 ±5°C 범위내의 정상상태 온도균일도와 50°C/sec 이상의 온도상승률(ramp-up rate)을 권장하고 있다[9]. 온도제어기는 온도센서로부터 측정치를 받아 디지털 펄프 제어 알고리즘을 수행하여 램프에 내보낼 전력량을 계산한다. 본 연구에서는 근사적으로 기준온도를 유지하도록 하는 정상제어입력 u_0 에 출력오차를 줄이기 위한 LQG 제어기의 제어입력 u 의 합으로 전체 제어입력을 결정하며, 성능의 확인 및 조정은 주파수 영역에서 루프 전달함수 행렬의 특이치 선도(singular value plot)를 이용하였다. LQG 제어기에 대한 블럭도는 그림 5와 같다. 여기서 RTP 시스템의 출력온도와 기준온도 y_0 의 오차인 y 를 이용하여 추정기에서 상태를 추정한다.

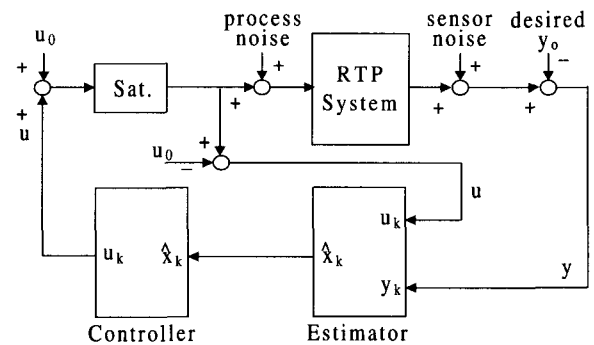


그림 5. LQG 제어기의 블럭도.

Fig. 5. The block diagram of LQG controller.

LQG 제어기법은 LQ 문제의 해인 선형 상태궤환 제어법칙과 상태변수 추정기(칼만필터)를 결합시킨 형태이다. 제어기 설계를 위해 식별된 다변수 이산시간 상태공간 모델을 나타내면 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + w_k \\
 y_k &= Cx_k + Du_k + v_k
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

여기서 x_k 는 5×1의 상태벡터이고, u_k 와 y_k 는 3×1의 다변수 입·출력벡터이다. A는 5×5의 시스템행렬, B는 5×

3의 입력행렬, C 는 3×5 의 출력행렬 그리고 D 는 3×3 의 직접전달행렬이며 실제로는 영행렬이다. 또한 추정기 설계를 위해 측정잡음 v_k 는 A/D 변환기의 분해능 0.3°C 를 고려하여 평균이 0이고 분산이 $0.3^2/12$ 의 균일한 분포를 갖는 백색잡음으로 간주하고, 유사하게 공정잡음 w_k 는 0~10V 제어입력에 12bit D/A 변환기를 고려하여 $(10 \cdot 2^{-12})^2/12$ 의 분산을 갖는 백색잡음으로 가정하였다.

이산시간 LQ 최적제어 문제는 (5)에서 주어진 성능지수를 최소화하는 u_k 를 결정한다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} E\{y_k^T Q y_k + u_k^T R u_k\} \quad (5)$$

여기서 Q 는 양의 반한정(positive semidefinite) 출력오차 가중행렬이고, R 은 양 한정(positive definite) 제어가중행렬로서 설계자에 의하여 적당한 값으로 정해진다. 식별된 RTP 시스템의 다변수 모델에서 출력오차의 가중도는 동일하다고 보고 $Q = 0.8 \times 10^{-4} I$ 로 정하였다. 그러나 제어가중도는 온도 균일도의 향상을 위해 램프구동기에서 출력되는 제어입력을 조절할 수 있는 요소로서 본 실험대상의 RTP 챔버 특성상 외곽의 램프열보다 중간지점의 램프열에 가중치를 더 두었을 때 향상된 온도균일도를 얻을 수 있었다. 제어가중행렬은 다음과 같다.

$$R = \begin{bmatrix} 0.096 & 0 & 0 \\ 0 & 0.162 & 0 \\ 0 & 0 & 0.053 \end{bmatrix}$$

LQ 문제를 풀어 주어지는 제어입력 $u_k = -K_k x_k$ 의 이득행렬 $K_k = (R + B^T S_{k+1} B)^{-1} B^T S_{k+1} A$ 는 다음의 리카티 방정식으로부터 유도된다[10].

$$S_k = A^T [S_{k+1} - S_{k+1} B (R + B^T S_{k+1} B)^{-1} B^T S_{k+1}] A + C^T Q C \quad (6)$$

한편 상태변수 궤환을 위한 상태변수 추정기는 이산시간 확률 동적 시스템 모델을 정의한 후, 아래와 같은 칼만 필터식으로 이루어진다. 그러나 RTP 시스템의 비선형성 때문에 온도대별로 정상상태 오차가 존재한다. 이점을 해결하기 위해 (7)과 같은 병합모델을 사용하여 제어입력에 추정된 bias양을 보상해 주었다[6].

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ b_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & O \\ C & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ b_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u_k + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} w_k \quad (7)$$

$$y_k = [C \ O] \begin{bmatrix} x_k \\ b_k \end{bmatrix} + D u_k$$

Measurement update:

$$\hat{x}_k = \bar{x}_k + P_k C^T R_v^{-1} (y_k - C \bar{x}_k) \quad (8)$$

여기서,

$$P_k = M_k - M_k C^T (C M_k C^T + R_v)^{-1} C M_k$$

Time update:

$$\bar{x}_{k+1} = A \hat{x}_k + B u_k \quad (9)$$

$$M_{k+1} = A P_k A^T + B_1 R_w B_1^T \quad (10)$$

이때 R_w, R_v 는 공정잡음과 측정잡음 w_k, v_k 의 공분산(covariance)을 말하며 다음 식을 만족한다.

$$E[w_k w_k^T] = R_w, \quad E[v_k v_k^T] = R_v \quad (11)$$

설계된 LQG 제어기에 대한 명령추종 성능, 외란제거 능력 그리고 센서잡음에 대한 저감도 성능을 알아보기 위해 주파수 영역에서 루프 전달함수 행렬의 특이치 선도를 나타내면 그림 6과 같다. 그림 6을 보면 설계된 제어기가 저주파 영역에서 명령추종 및 외란제거 능력을 위해 루프 전달함수 행렬의 특이값이 큰 값을 갖는다. 고주파 영역에서는 센서잡음에 대한 저감도를 위해 작은 특이값을 갖고, cut-off rate는 -40dB/dec 이다. 이상을 종합하면 설계된 제어기가 바람직한 루프 형상을 하고 있음을 알 수 있다.

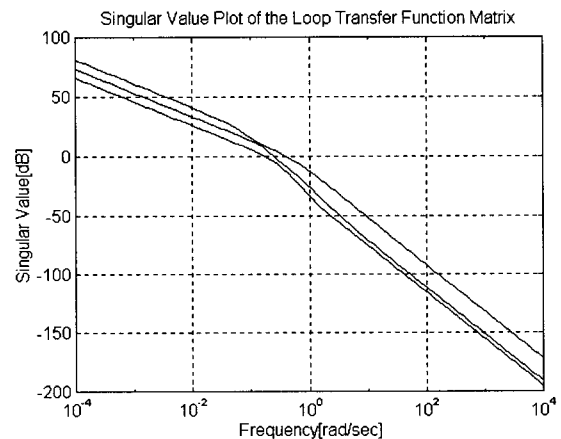


그림 6. 루프 전달함수 행렬의 특이치 선도.

Fig. 6. Singular value plot of the Loop TFM.

V. 실험결과 및 고찰

설계된 다변수 LQG 제어기의 성능을 검증하기 위하여 실제 시스템인 6인치용 고속 열처리 공정기에 적용하여 실험을 수행하였다. 이때 제어기 하드웨어는 Bluewaves社의 DSP(TI320C32) 보드이고, 온도제어 프로그램은 Matlab의 Simulink를 이용하여 작성하였다. 이때 Realtime Workshop을 사용하여 실시간 제어가 가능하도록 하였고, DSP 보드 내부의 아날로그 입출력 보드를 통해 데이터를 교환한다. 열전대 증폭기(Thermocouple Amplifier)는 RTP 반응챔버 내부의 웨이퍼에 부착된 열전대센서를 통해 출력된 전류신호를 증폭하여 온도로 출력하고 그 결과를 제어기로 보낸다. 그림 7은 실험환경을 보여준다.

본 논문에서 설계된 제어기는 미세한 박막의 형성을 위해 정상상태에서 웨이퍼 전 영역에 균일한 온도를 유지하도록 설계되었다. 그림 8은 800°C , 900°C 에 대해 단일시스템으로 제어실험을 수행한 후 실시간으로 저장된 결과를 나타낸다. 기준 온도 프로파일은 초기온도에서 70°C/sec 의

기울기로 증가하고, 설정온도로 60초동안 유지하고 냉각된다. 그래프는 웨이퍼의 세 점에서 측정된 온도와 램프전력 구동기에 인가되는 전압을 표시한다. 램프전력 구동기는 앞의 빠른 온도상승률을 만족하도록 각 램프에 허용가능한 최대전력을 공급한 후 설정온도 가까이에서 LQG 제어기로 전환한다.

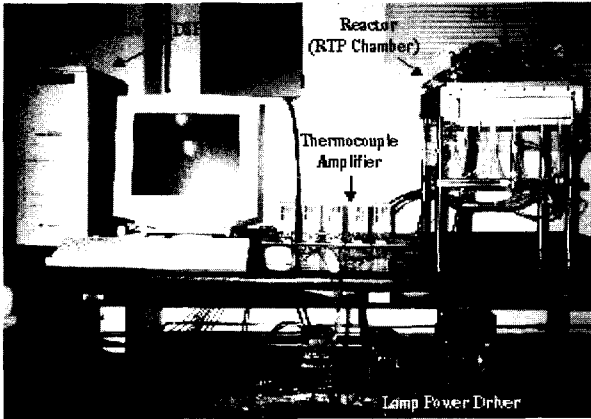
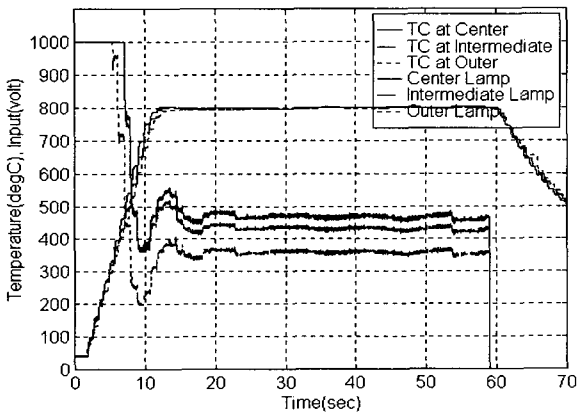
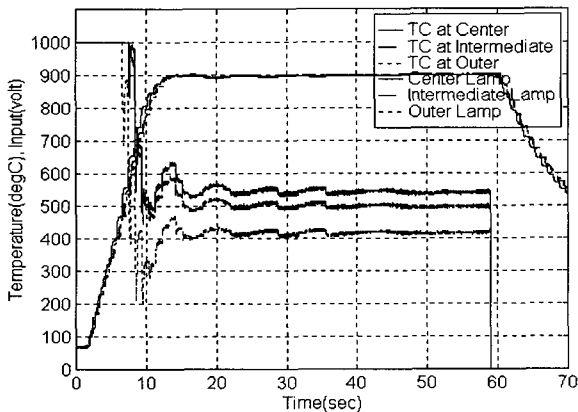


그림 7. 실험환경.
Fig. 7. Experiment environment.



(a) 800°C



(b) 900°C

그림 8. RTP 시스템의 온도궤적.
Fig. 8. Temperature trajectories of RTP system.

그림 8에서 온도궤적은 초기에 빠른 온도상승과 정상상태에서 온도가 일정하게 잘 제어되고 있음을 알 수 있다. 실험결과에서 관심있는 온도균일도 측면을 좀 더 자세히 알아보기 위해 세곳에서 측정된 온도 중 최대값과 최소값의 차이인 최대온도편차를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 LQG 제어를 수행한 결과 균일도가 과도기를 지나 정상상태에서 3°C 미만임을 알 수 있다.

설계된 LQG 제어기의 향상된 온도균일도를 비교하기 위해 같은 대상에 단변수 형태의 PID 제어를 수행한 후의 최대온도편차는 그림 10과 같다[11]. 이 그림에서 온도균일도는 정상상태에서 약 7°C 정도이다.

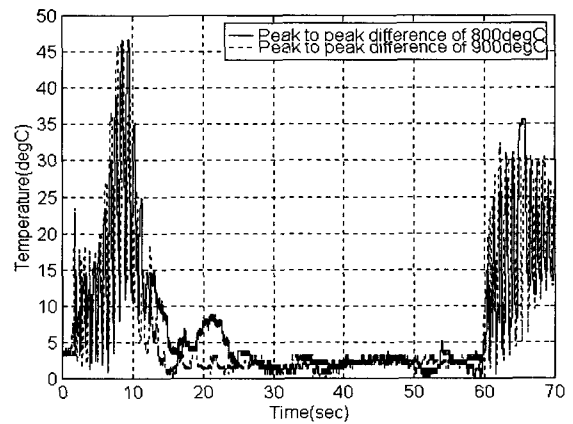


그림 9. LQG 제어결과 최대온도편차.
Fig. 9. Maximum temperature difference with LQG control.

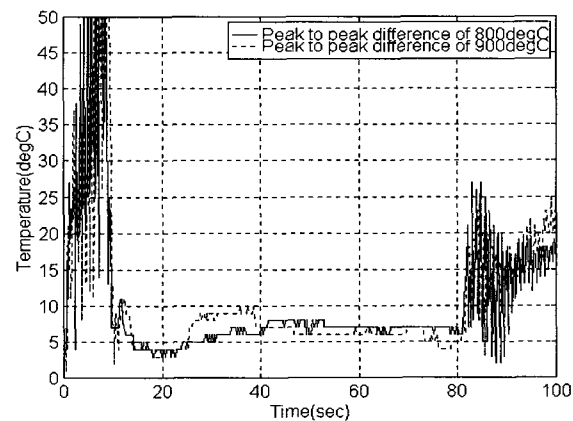


그림 10. PID 제어결과 최대온도편차.
Fig. 10. Maximum temperature difference with PID control.

이상의 실험결과로 정상상태에서 최대온도편차의 평균값과 최대값을 정리하면 표 1과 같다. 최대온도편차의 평균값은 3°C 범위내에 있으며, 같은 대상에 단변수 형태의 PID 제어를 수행한 실험결과와 비교할 때 균일도가 평균

4°C 향상되었다.

표 1. LQG와 PID 제어결과 비교.

Table 1. Comparison of LQG and PID control result.

		800°C	900°C
LQG 제어결과	온도편차(평균값)	2.92°C	2.06°C
	온도편차(최대값)	8.77°C	5.28°C
PID 제어결과	온도편차(평균값)	6.35°C	6.39°C
	온도편차(최대값)	10.74°C	11.02°C

VI. 결론

본 논문에서는 고속 열처리 공정기내 균일한 웨이퍼의 온도제어를 위해 다변수 LQG 제어를 설계하여 적용하였다. 이때 웨이퍼의 열전달 모델을 추정하기 위해 부분공간 적합화법을 적용하여 식별을 수행하였고, 주파수 영역에서 루프 전달함수 행렬의 특이치 선도를 이용하여 다소 경험적으로 설계변수(가중치들)를 선정하였다.

실험결과 정상상태 오차가 거의 없고, 빠른 온도상승과 정상상태에서 균일한 온도분포(ramp-up rate 67°C/sec, uniformity 3°C 내외) 측면에서 전체 온도제어 시스템은 만족할 만한 성능을 보였다. 관련 추후연구과제로는 적절한 가중행렬 Q, R의 선정을 위해 정밀한 루프 회복과정을 포함하는 LQG/LTR 기법으로의 확장 등을 들 수 있다.

참고문헌

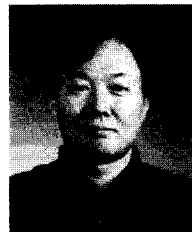
[1] R. B. Fair, *Rapid Thermal Processing: Science and Technology*, Academic Press, Inc., 1993.
 [2] S. Norman, "Wafer temperature control in rapid thermal processing," *Ph. D. Dissertation Stanford Univ.*, 1992.

[3] 최병욱, 권욱현 외2인, "A robust controller design for uniform temperature control of nonlinear multi-variable rapid thermal processor," *Jour. of Electrical Eng. and Information Science*, vol. 2, pp. 8-16, 1997.
 [4] 정영석, 이광순, 최진훈, "Q-ILC를 이용한 고속열처리 공정의 온도 제어," 한국자동제어학술회의논문집, pp. 1189-1192, 1998.
 [5] 최진영, 도현민, "신경망기반의 반복학습제어를 이용한 고속열처리공정기의 온도제어," 제어계측·자동화·로보틱스 합동학술발표회논문집, pp. 88-91, 1999.
 [6] Y. M. Cho and P. Gyugyi, "Control of rapid thermal processing: A system theoretic approach," *IEEE Trans. on Control System Tech.*, pp. 644-653, 1997.
 [7] A. Swindlehurst, R. Roy, B. Ottersten, and T. Kailath, "A subspace fitting method for identification of linear state space model," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 40, no. 2, pp. 311-316, 1995.
 [8] B. De Moor, M. Moonen, L. Vandenberghe, and J. Vandewalle, "A geometrical approach for the identification of state-space models with singular value decomposition," in *Proc. IEEE ICASSP*, vol. 4, pp. 2244-2247, 1988.
 [9] A. Emami-Naeini, M. G. Kabuli, and R. L. Kosut, "Finite time tracking with actuator saturation: application to RTP temperature trajectory following," *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 73-78, 1994.
 [10] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems*, Addison Wesley, 1998
 [11] 송태승, 유 준, "고속 열처리 공정을 위한 Bang-Bang/PID 온도제어기법," 전기전자학회 논문지, vol. 3, no. 1, pp. 109-117, 1999.



송 태 승

1974년 6월 16일생. 1997년 2월 충남대학교 전자공학과(학사). 1999년 2월 충남대학교 전자공학과(석사). 1999년 3월 ~ 현재 동 대학원 박사과정. 주 관심분야는 반도체공정제어, 다변수 제어, 식별 및 추정 등임.



유 준

1956년 3월 22일생. 1978년 2월 서울대학교 전자공학과(학사). 1980년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(석사). 1984년 8월 동 대학원(박사). 1984년 10월부터 현재까지 충남대학교 전자공학과 교수. 1997년 2월부터 1998년 2월까지 미 캘리포니아 주립대 방문교수. 주 관심분야는 제어 및 정보시스템, 산업공정제어/신호처리, 식별 및 추정/고장검출 등임.